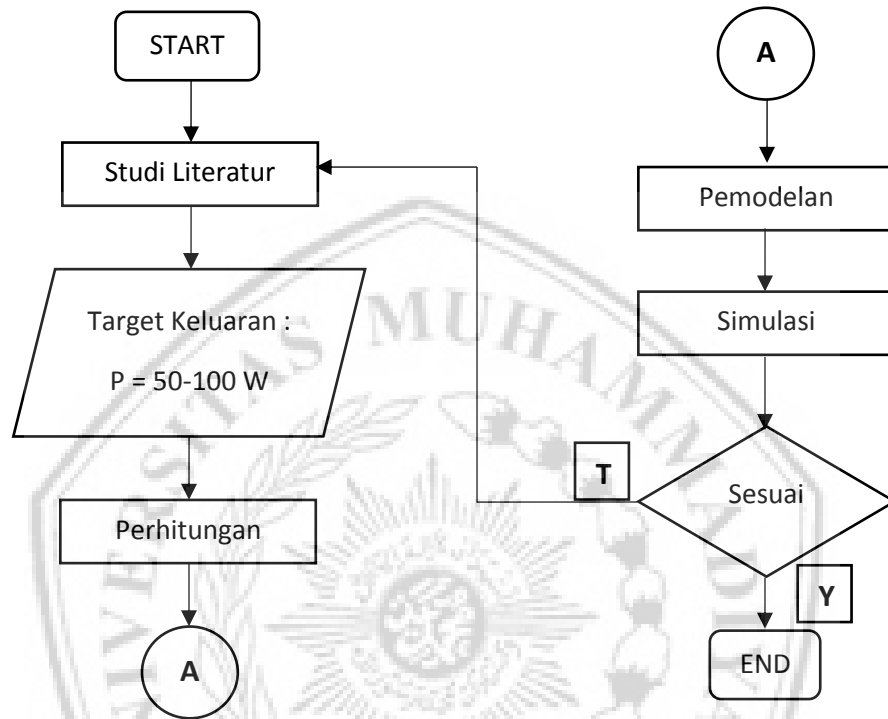


BAB III

PEMODELAN DAN SIMULASI

3.1 Flowchart Desain *Double Stator dan Triple Rotor* GMPFA



Gambar 3.1 Flowchart Desain GMPFA

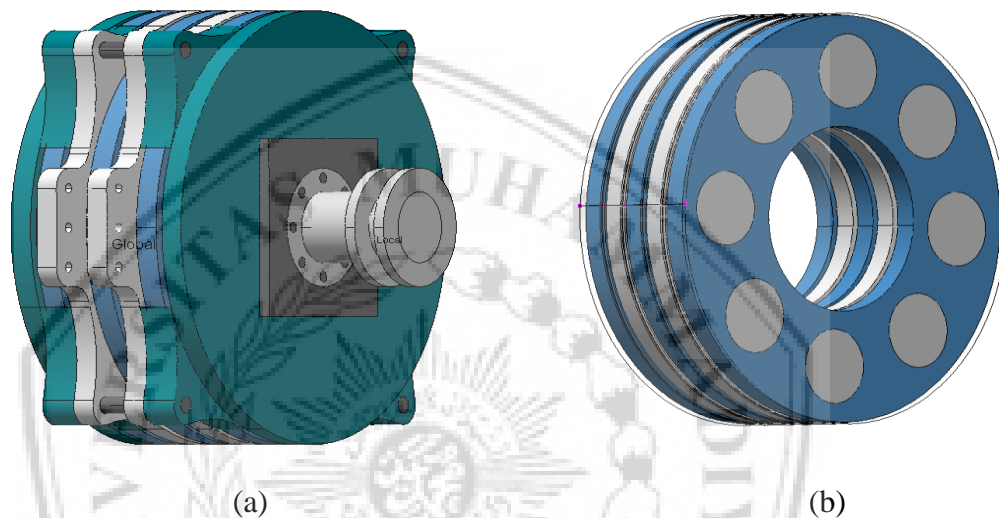
Pada gambar 3.1 merupakan flowchart pembuatan desain GMPFA dengan *double* stator dan *triple* rotor. Agar mendapatkan desain yang diinginkan, maka bagian yang terdapat pada flowchart harus terpenuhi.

3.2 Studi Literatur

Studi literatur dalam penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan gambaran tentang penelitian yang akan dilakukan dengan cara mengumpulkan beberapa referensi dari jurnal nasional dan internasional, buku text, e-book, dan paper.

3.3 Desain Generator

Desain model yang dibuat pada tugas akhir ini adalah sebuah generator magnet permanen flux axial dengan tiga rotor dan dua stator, dimana desain nantinya akan dibandingkan dengan beberapa desain generator lainnya. Bentuk konstruksi generator yang digunakan seperti piringan berlapis yang terdiri dari dua stator berada diantara tiga buah rotor, seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.2 berikut.



Gambar 3.2 Generator magnet permanen *double stator - triple rotor*,
(a). Bentuk generator, (b). Kontruksi *double stator-triple rotor*

Generator yang didesain untuk simulasi merupakan desain yang sesuai dengan besar generator aslinya (skala 1:1). Dimana desain ini terdiri dari 3 bagian utama yaitu bagian rotor, stator, dan *air gap* (celah udara). Selain itu, desain ini juga terdiri dari 12 slot dan 8 pole dimasing-masing stator dan rotornya, kemudian dijalankan dengan beberapa variasi kecepatan putar yang berbeda untuk mendapatkan hasil keluaran yang nantinya akan dibandingkan dengan besar fluks magnetik, tegangan, arus, daya dan efisiensi sehingga dapat dihasilkan desain yang paling optimal.

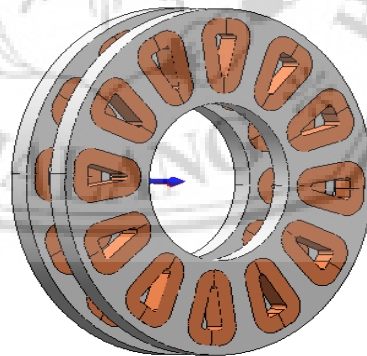
Pada desain generator ini, ada beberapa spesifikasi yang telah ditentukan terlebih dahulu seperti yang ditunjukkan pada tabel 3.1 berikut.

Tabel 3.1 Spesifikasi desain GMPAF (*Double Stator-Triple Rotor*)

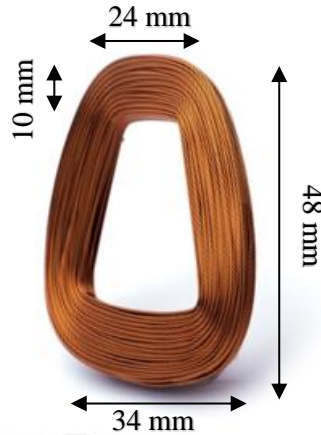
Power, P	100 watt
Jumlah fasa, m	3
Jumlah kutub, p	24
Frekuensi, f	60 Hz
Kecepatan, n	250, 350 dan 500 rpm
Jumlah kumparan, S	24

3.3.1 Stator

Stator yang digunakan pada generator ini adalah jenis stator tanpa inti (*coreless*), dimana stator hanya berupa kumpulan lilitan kawat yang bagian tengahnya terdapat celah udara. Stator yang dibuat diatur agar mendapatkan hasil tegangan keluaran 3 fasa dan tiap fasa terdiri dari 3 kumparan stator. Jadi pada model generator ini terdapat 12 buah kumparan dimasing-masing statornya. Susuna kumparan stator pada generator dibuat tidak menumpuk (*non-overlapping*).



Gambar 3.3 Konstruksi stator pada generator



Gambar 3.4 Konstruksi Coil pada Stator

Bentuk stator yang digunakan pada desain adalah bentuk trapezoidal karena bentuk ini menghasilkan tegangan induksi yang lebih baik dibandingkan dengan bentuk rectangular. Untuk detail model dari desain stator, dapat dilihat pada tabel 3.2 berikut.

Tabel 3.2 Dimensi Model Stator

Diameter Luar	220 mm
Diameter Dalam	50 mm
Tebal <i>Yoke</i> Stator	10 mm
Luas Dalam Lubang <i>Slot</i>	5 mm
Material Inti Stator	<i>Epoxy resin</i>
Material Inti Lilitan	<i>Copper: 5.77e7 Siemens</i>
Jumlah Lilitan	100 <i>turns</i>
Jumlah <i>Slot</i>	12
Jumlah fasa	3

Dalam menentukan diameter stator pada pemodelan generator terutama diameter luar stator (D_{out}), ada beberapa parameter yang harus diketahui terlebih dahulu seperti nilai daya (P_{out}) = 100 watt, faktor distribusi (K_D) = 0.131, putaran (n) = 3.5 rad/s, kepadatan fluks magnet (B_{mg}) = 1.39 T, nilai kerapatan arus (A_m) = 5000 A/m, dan efisiensi (η) = 90 %. Parameter tersebut mengacu pada referensi [9], dengan

begitu kita dapat mengetahui diameter luar dari generator berdasarkan persamaan (2.2), maka didapatkan hasil perhitungan sebagai berikut :

$$D_{out} = \sqrt[3]{\frac{2 \times 100}{9,8596 \times 0,131 \times 0,96 \times 3,5 \times 1,39 \times 5000 \times 0,9 \times 0,8}}$$

$$= 0,22 \text{ m} \approx 220 \text{ mm}$$

Sedangkan untuk menentukan diameter dalam (D_{in}) pada stator dilakukan dengan cara asumsi yaitu memilih ukuran diameter dalam yang sesuai dengan diameter luar dan ukuran magnet yang akan digunakan.

Selain menentukan diameter, dalam pembuatan stator juga menentukan banyaknya jumlah lilitan yang akan digunakan. Untuk itu digunakan persamaan (2.3) sebagai berikut :

$$\frac{N_t}{2} = \frac{5}{\frac{\pi \cdot (220 \cdot 10^{-3})^2}{4}}$$

$$= 131 \text{ lilitan}$$

Setelah itu menentukan nilai arus pada lilitan stator dengan menggunakan persamaan (2.4). Berikut nilai arus pada lilitan stator :

$$I_a = \frac{100}{3 \times 220 \times 0,8}$$

$$= 0,189 \text{ A}$$

Dalam menentukan luas penampang kawat tembaga yang akan digunakan, dapat menggunakan persamaan (2.5) sebagai berikut :

$$S_a = \frac{0,189}{1 \times 4,5}$$

$$= 0,8505 \text{ mm}^2$$

Penentuan diameter kawat juga dilakukan agar dapat menghasilkan daya yang diinginkan. Dalam menentukan diameter kawat digunakan persamaan (2.6) untuk

menentukan diameter yang sesuai. Berikut hasil persamaan yang dalam menentukan diameter kawat :

$$d = \sqrt{\frac{4(0,8505)}{3,14}}$$

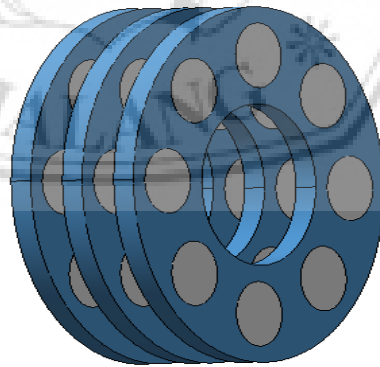
$$= 1,04088 \text{ mm}$$

Selanjutnya menentukan jarak antar slot satu dengan slot lainnya agar tidak saling bersentuhan. Dengan menggunakan persamaan (2.7), maka jarak antara slot dapat ditentukan. Berikut perhitungan yang telah dilakukan :

$$\theta_s = \frac{(2.180)}{12} = 30 \text{ rad}$$

3.3.2 Rotor

Pada desain generator yang dibuat memiliki tiga buah rotor yang diletakkan diantara dua stator. Untuk tiap-tiap rotor terdiri dari dua bagian yaitu tatakan penyangga (*yoke*) dan magnet permanen. Jumlah kutub yang digunakan ada 8 pasang kutub ditiap-tiap rotornya yang disusun dengan tipe NS. Pemilihan tipe NS ini dinilai tepat untuk generator axial tanpa inti agar kerapatan flux yang dihasilkan menjadi lebih besar.



Gambar 3.5 Konstruksi rotor pada generator

Bentuk magnet permanen yang digunakan adalah bentuk sirkular yang dipasang secara *embedded* (tertanam). Pemilihan bentuk magnet ini dikarenakan

bentuk sirkular memiliki kerapatan flux yang lebih besar dibanding dengan bentuk rectangular.

Magnet permanen yang digunakan adalah NdFeB (*neodymium-iron-boron*) dengan grade N52M yang merupakan standar dari Cina. Berikut merupakan karakteristik dari magnet NdFeB grade N52M yang diperlihatkan pada tabel 3.3.

Tabel 3.3 Karakteristik Magnet NdFeB grade N52M

Parameter, simbol	Besaran	Satuan
Kerapatan fluks remanensi	1,39	T
• Coercive force, H_{cb}	1060650	Oe (A/m)
• Intrinsic Coercive Force, H_{cj}	11,0 (876)	kOe (kA/m)
• Energy Product, BH_{max}	50 – 53 (398-422)	MGO (KJ/m ³)
• Max. Operating Temp.	20	°C

Untuk detail dari model desain rotor, dapat dilihat pada tabel 3.4 berikut.

Table 3.4 Dimensi model Rotor

Diameter Luar	220 mm
Diameter Dalam	50 mm
Tebal <i>Yoke</i> Rotor	10 mm
Material Inti Stator	<i>Cr: 10 Cold Roll 1010 Steel</i>
Jenis Magnet	<i>Neodymium Iron-Boron</i>
Bentuk Magnet	Sirkular
Diameter Magnet	40 mm
Tebal Magnet	2 mm
Jumlah <i>pole</i>	8

Dalam menentukan diameter rotor pada generator terutama diameter luar rotor, cara menentukannya sama dengan cara pada saat menentukan diameter luar stator,

yaitu dengan menggunakan parameter-parameter yang mengacu pada referensi[9], kemudian dilanjutkan kedalam bentuk persamaan (2.2) yang terdapat pada bab 2.

Selain itu dalam pemodelan rotor, menentukan flux magnet juga dilakukan untuk digunakan dalam membandingkan hasil *output* dari generator. Oleh karena itu digunakan persamaan (2.8) untuk mendapatkan nilai flux magnet sebagai berikut :

$$\begin{aligned}\Phi_f &= \frac{2}{\pi} \times 1,39 \times \frac{\pi}{64} [(0,5 \times 0,22)^2 - (0,5 \times 0,10)^2] \\ &= 0,000417 \text{ Wb}\end{aligned}$$

Selain menentukan nilai flux magnet, nilai tegangan juga ditentukan. Karena besarnya flux magnet berpengaruh dengan tegangan yang dihasilkan. Berikut persamaan (2.9) yang digunakan dalam menentukan nilai tegangan :

$$\begin{aligned}E_f &= 4,44 \times 60 \times 131 \times 0,96 \times 0,000417 \\ &= 13,98 \text{ Volt}\end{aligned}$$

Dalam menentukan luas penampang magnet digunakan persamaan (2.10) sebagai berikut :

$$\begin{aligned}S_m &= 3,14 \times \frac{50+220}{2} \times \frac{1}{8} \times 40 \\ &= 2,1195 \text{ mm}\end{aligned}$$

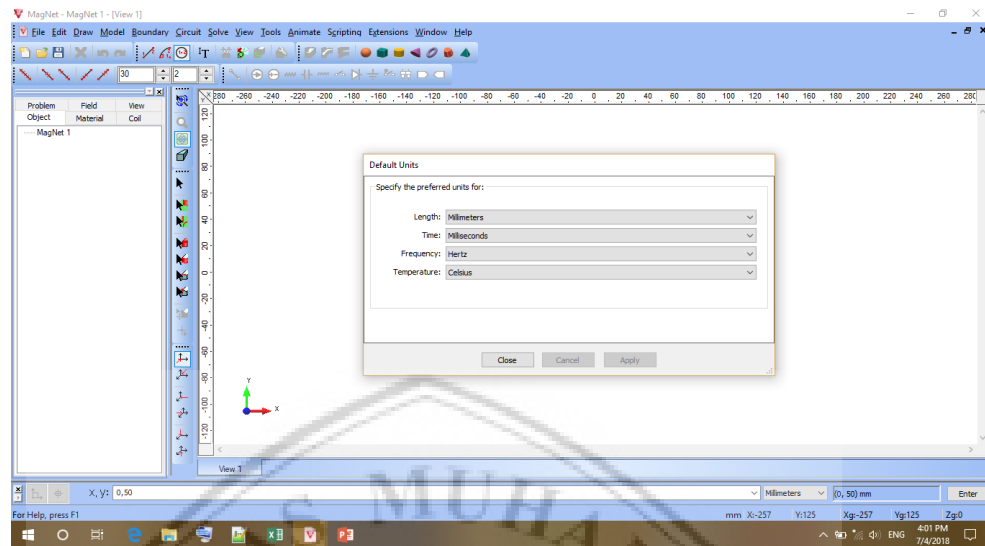
Untuk menentukan jarak antara magnet satu dengan magnet lainnya, digunakan persamaan (2.11) sebagai berikut :

$$\theta_p = \frac{(2.180)}{8} = 45 \text{ rad}$$

3.4 Pemodelan Desain

Desain generator magnet permanen tanpa inti besi dengan 12 kumparan dan 8 magnet, ditunjukkan pada gambar dibawah ini :

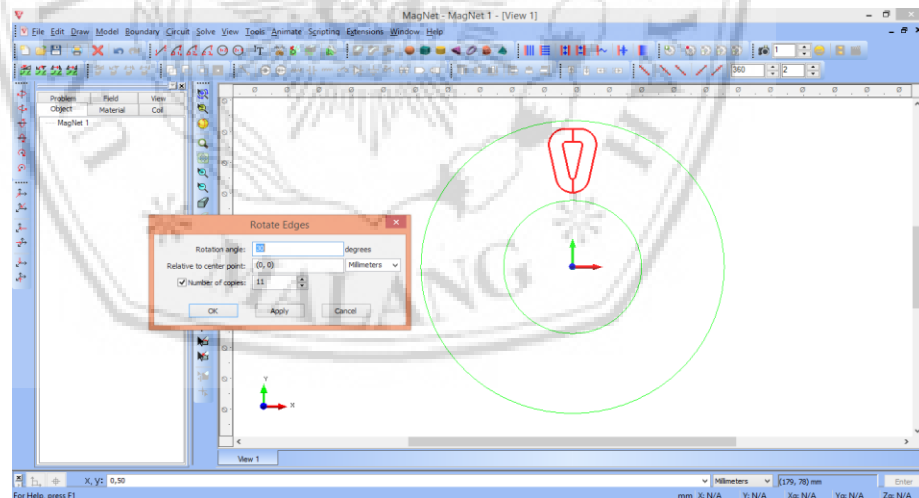
3.4.1 Setting awal pada software magnet infolytica



Gambar 3.6 Setting Awal

Pada bagian ini yang perlu diperhatikan adalah ukuran lembar kerja yang akan digunakan. Dirubah dari meter menjadi millimeter.

3.4.2 Pembuatan Bagian Stator

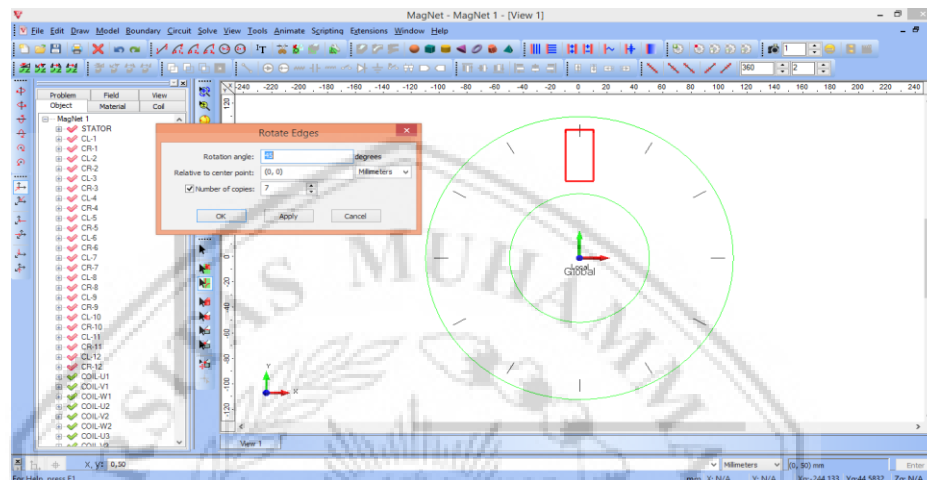


Gambar 3.7 Proses Pembuatan Stator

Pada bagian ini, hal pertama yang dilakukan adalah membuat dua buah lingkaran sebagai tatakan peyangga dari stator yang berfungsi sebagai tempat meletakkan *coil*. Kedua, pembuatan *coil* dengan menggunakan “*Rotate Edges*” kemudian dicopy menjadi 12 *coil*. Dimana jarak antara *coil* disesuaikan dengan

persamaan (2.9). Ketiga, menentukan material untuk stator dan *coil*. Untuk *coil* terbagi menjadi dua bagian yaitu *coil left* dan *coil right*, dimana pada bagian tersebut akan menghasilkan sejumlah fasa sesuai dengan jumlah slot yang ditentukan.

3.4.3 Pembuatan Bagian Rotor

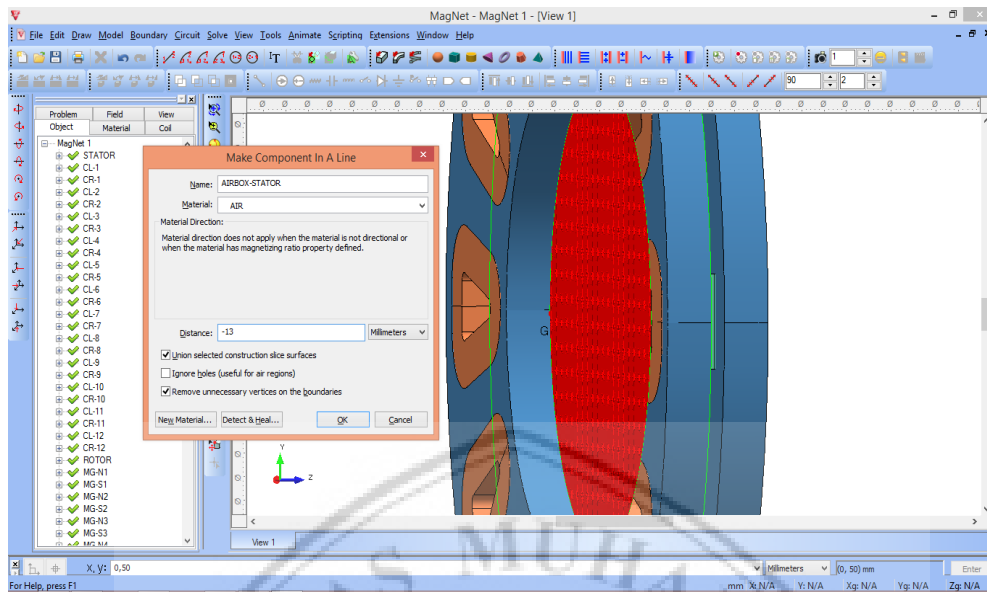


Gambar 3.8 Proses Pembuatan Rotor

Pada pembuatan rotor, hal yang pertama dilakukan sama seperti pada saat pembuatan stator yaitu membuat dua buah lingkarang dengan diameter berbeda. Kedua, pembuatan magnet menggunakan “*Rotate Edges*”, kemudian di *copy* menjadi 8 magnet. Dimana jarak antara magnet disesuaikan dengan hasil dari persamaan 2.10. Ketiga, menentukan material pada rotor dan magnet. Untuk magnet terbagi menjadi dua yaitu magnet N dan magnet S, dimana masing-masing magnet memiliki arah yang berlawanan.

3.4.4 Pembuatan Air Gap

Hal pertama yang dilakukan dalam pembuatan air gap adalah membuat satu lingkaran dimana diameter lingkaran dlebihkan 1 mm dari diameter stator dan rotor. Kedua, memilih material untuk air gap. Ketiga menentukan lebar air gap, baik air gap rotor maupun air gap stator harus seimbang.



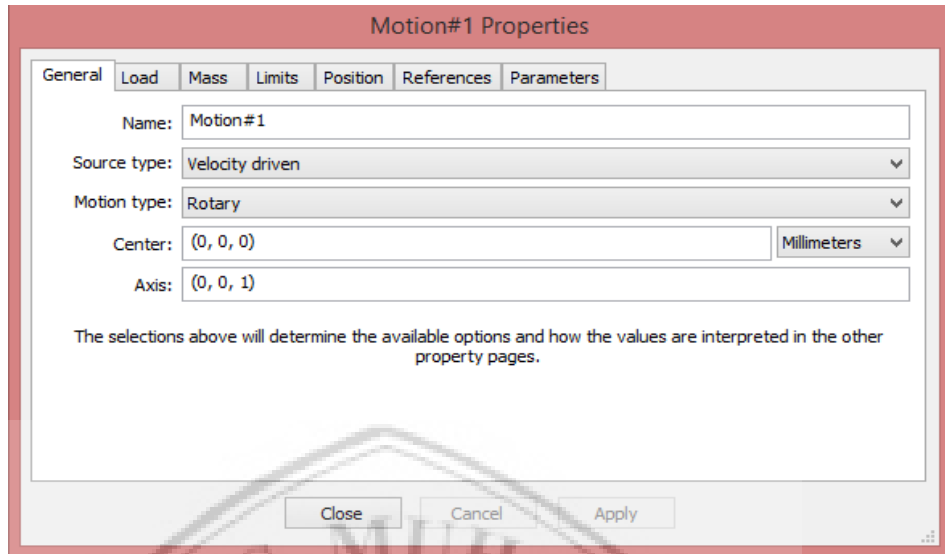
Gambar 3.9 Proses Pembuatan Air Gap

3.5 Simulasi

Sebelum melakukan simulasi, ada beberapa tahapan yang dilakukan diantaranya mengatur parameter-parameter simulasi seperti pembuatan *motion* atau mengatur bagian mana saja yang akan berputar dengan kecepatan yang telah ditentukan, dan juga mengatur waktu yang dibutuhkan untuk berputar dengan kecepatan yang telah ditentukan oleh generator MPFA. Selain itu simulasi juga dilakukan dengan 2 tahap yaitu simulasi tanpa beban dan simulasi dengan beban.

3.5.1 Pengaturan *Motion* dan Waktu

Motion merupakan salah satu langkah dalam simulasi, dimana langkah ini digunakan untuk menentukan bagian-bagian mana saja yang berputar pada generator MPFA. Adapun bagian-bagian yang diatur untuk berputar pada simulasi ini adalah semua bagian rotor. Untuk simulasi generator pada pilihan *Source type* memilih *Velocity driven*.



Gambar 3.10 Parameter *motion* GMPFA

Pada GPMFA ini kecepatan putar yang digunakan berada pada kecepatan 500 rpm. Setelah itu nilai kecepatan putar yang sebelumnya bernilai (*rpm*) dikonversi menjadi nilai (*deg/s*), dimana satu rotasi = 360 (*deg*), dan satu menit = 60 detik. Berikut persamaannya,

$$n = 500(\text{rpm}) = \frac{500 \times 360(\text{deg})}{60(\text{sec})} = 3000 \left(\frac{\text{deg}}{\text{s}} \right)$$

Pada simulasi GPMFA, untuk mendapatkan satu gelombang penuh dilakukan pencuplikan data sebanyak 30 step putaran mekanikal, dimana pada setiap satu step putaran mekanikal bernilai 3(*deg*). Sehingga waktu yang dibutuhkan untuk melakukan putaran dapat diketahui dari persamaan berikut,

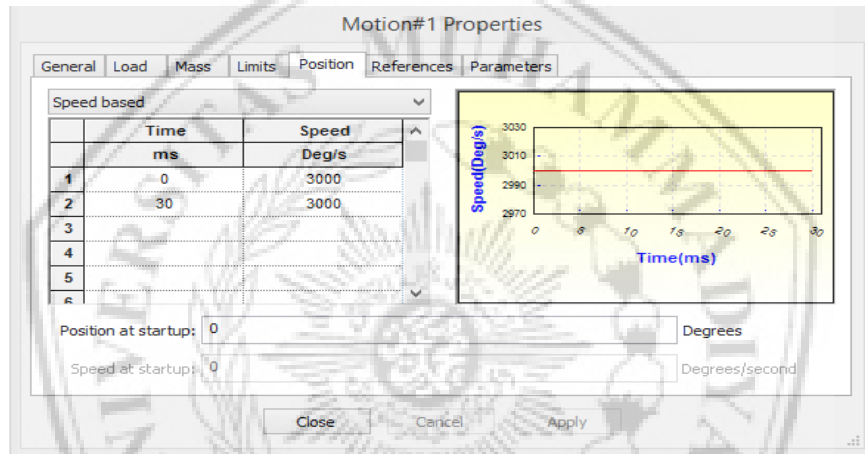
$$\text{waktu satu step putaran mekanikal} = \frac{\text{perstepputan}(\text{deg})}{n[\text{deg/sec}]}$$

$$\text{waktu satu step putaran mekanikal} = \frac{3(\text{deg})}{3000[\text{deg/sec}]} = 0.001(\text{sec}) = 1(\text{ms})$$

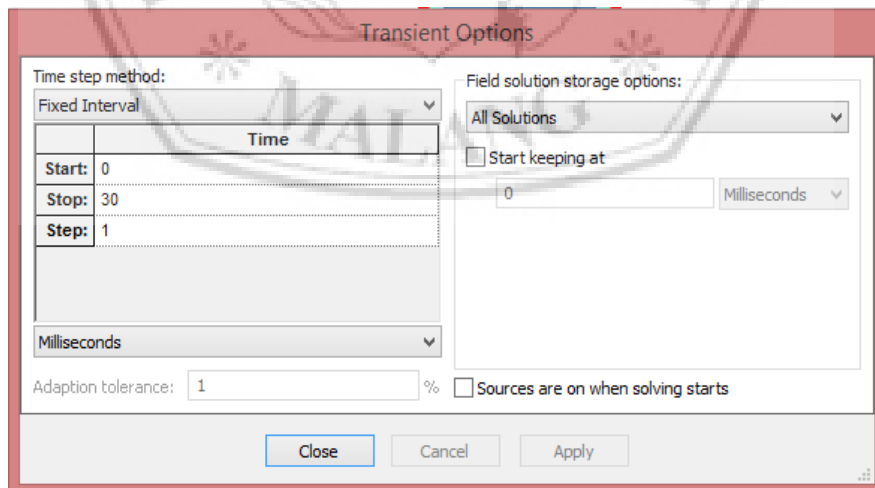
Dari hasil perhitungan dapat diketahui bahwa setiap step putaran membutuhkan waktu sebesar 1(ms). Sehingga untuk mendapatkan satu gelombang penuh dengan 30 step putaran membutuhkan waktu sebanyak :

$$\text{waktu 30 step putaran} = 30(\text{step}) \times 1(\text{ms}) = 30(\text{ms})$$

Setelah waktu yang dibutuhkan didapatkan, maka selanjutnya memasukkan nilai waktu tersebut kedalam menu *position* pada bagian *Motion* seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.11 dan menu *Transient Option* seperti pada gambar 3.12.



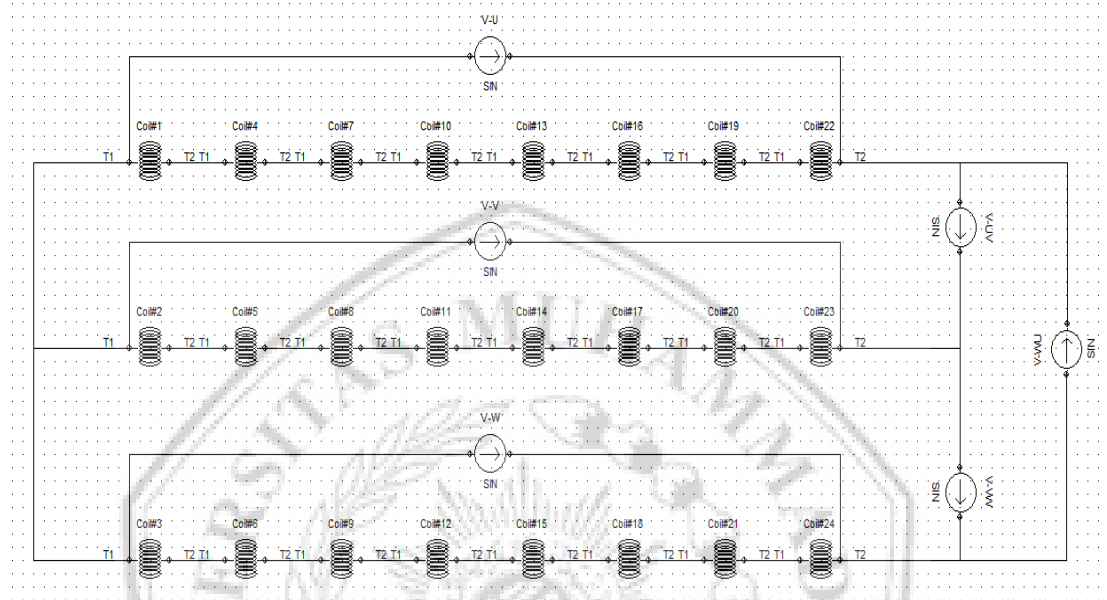
Gambar 3.11 Parameter waktu dan kecepatan putar GMPFA



Gambar 3.12 Parameter *Transient Option* pada software MagNet Infolytica

3.5.2 Simulasi Tanpa Beban

Pada simulasi tanpa beban GMPFA menghasilkan tengangan fasa dan tegangan antar fasa. Berikut rangkaian untuk simulasi tanpa beban yang ditunjukkan pada gambar 3.13.

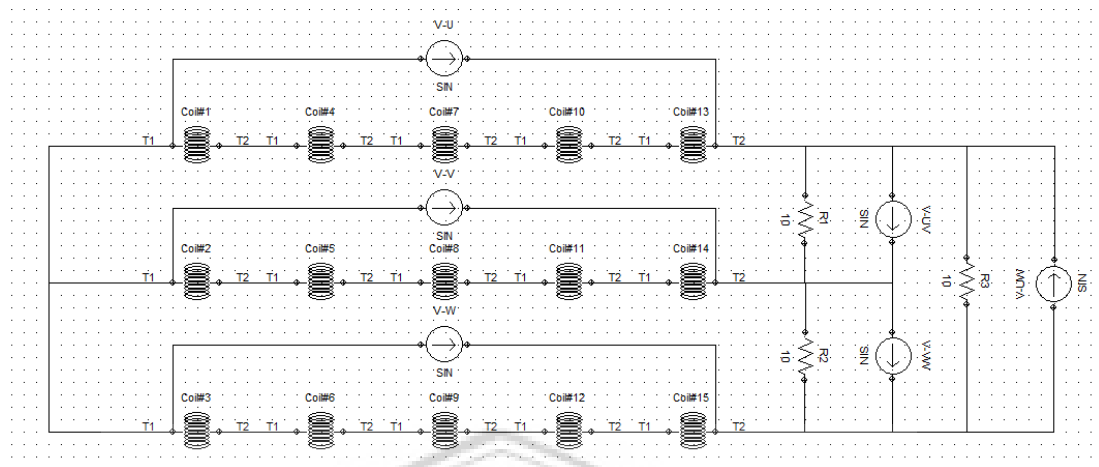


Gambar 3.13 Rangkaian simulasi tanpa beban

Pada *coil* 1 sampai *coil* 22 merupakan lilitan fasa U, *coil* 2 sampai *coil* 23 merupakan lilitan fasa V, dan *coil* 3 sampai *coil* 24 merupakan lilitan fasa W. Ketiga lilitan fasa dirangkai dengan menggunakan hubung bintang. Pada rangkaian juga terdapat V-U, V-V, V-W, V-UV, V-VW, dan V-WU yang digunakan sebagai alat ukur. Untuk V-U, V-V, dan V-W digunakan untuk mengukur masing-masing tegangan fasa. Sedangkan untuk V-UV, V-VW, dan V-WU digunakan untuk mengukur tegangan antar fasa pada GMPFA.

3.5.3 Simulasi dengan Beban

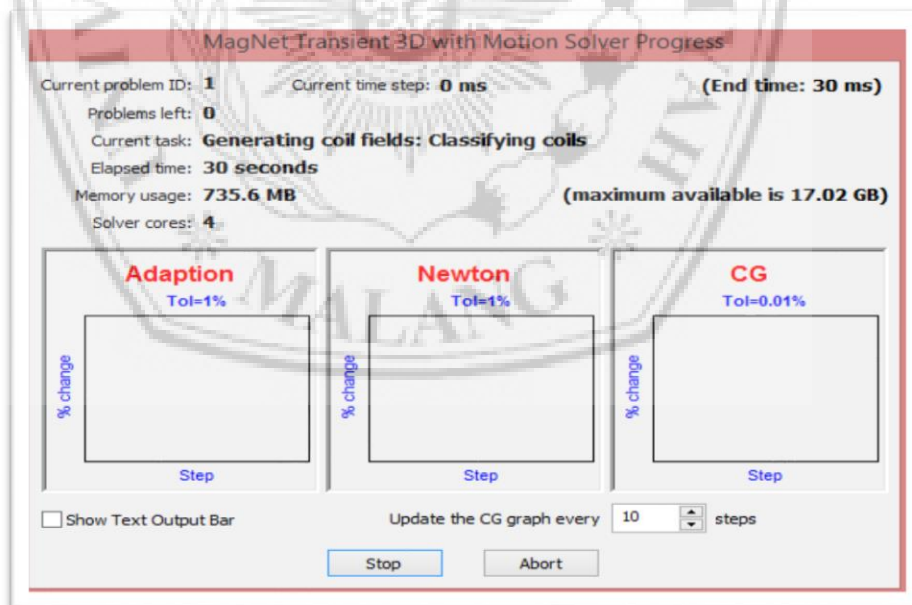
Pada simulasi dengan beban GMPFA menghasilkan tegangan, arus, dan torsi. Pada simulasi ini GMPFA akan diberikan 5 beban berbeda diantaranya 10 Ohm, 30 Ohm, 50 Ohm, 80 Ohm, dan 100 Ohm. Berikut gambar rangkaian untuk simulasi dengan beban.



Gambar 3.14 Rangkaian simulasi dengan beban

3.5.4 Simulasi Pada *Software* MagNet Infolytica

Setelah semua parameter diatur, maka proses selanjutnya adalah melakukan simulasi. Akhir dari proses simulasi adalah ketika waktu untuk melakukan putaran telah selesai, yaitu ketika 30 step putaran mekanikal telah selesai disimulasikan, maka hasil dari simulasi akan keluar berupa data-data pada GMPFA.



Gambar 3.15 Proses Simulasi pada *software* MagNet Infolytica